



**SZÉCHENYI
EGYETEM**
UNIVERSITY OF GYŐR



TDK DOLGOZAT

UAV-val megvalósítható tesztek konceptiója

Kovács Tamás, Merkli Kornél

**Villamosmérnök MSc
Infokommunikáció**

2022

1 Bevezetés

UAV-val megvalósítható tesztek koncepciója

A hagyományos felhasználású drónok ISM (Industrial, Scientific and Medical) frekvenciasávokat használnak működésük közben, ez azonban korlátozhatja az eszközök hatótávolságát. A korlátozások az alkalmazott technológiától függenek e frekvenciasávokban. Viszont a mobilhálózatok használatával a BVLOS (Beyond Visual Line of Sight) UAV műveletek is biztonságosan megvalósíthatóvá válnak. A mobilhálózatokban használt bázisállomások a légtér alsóbb, földfelszín közeli rétegeit célozzák meg. Így tehát a drónos repülések megvalósításához a felsőbb légrétegek lefedését is meg kell tervezni. A lakossági mobilhálózatok mérésénél alkalmazott teszteljárások rögzítik a hálózat minőségi paramétereit, amelyeket gyalogosan vagy személygépjármű segítségével mértek. A tervezéshez és az üzembehelyezéshez mérések szükségesek, amelyek elvégzését csak drónok használatával lehet megvalósítani. Az újabb légréteg lefedésének esetén elengedhetetlen az állomások elektromágneses expozíciójára vonatkozó vizsgálatok. Valamint a mérések kidolgozása során további vizsgálatok megvalósításának lehetőségét taglaljuk, amelyek által az előzőekben említett méréseken kívül további vizsgálatokat tudunk végezni és különböző mérőberendezéseket illeszthetünk a drónos rendszerbe, mint az NR hálózatok nyálábformálásának hatás vizsgálata az elektromágneses expozíció szintekre. Ezáltal a mérési idő több esetben is lerövidülhet, hiszen jóval egyszerűbb és gyorsabb egy adott területet berepülni egy drónnal mint azt gyalogosan vagy egyéb járművel bejárni. Sok hely nehezen megközelíthető, valamint ezzel az eljárással a balesetveszélyes területek is vizsgálhatóvá válnak, hiszen az emberi sérülés kockázata minimálisra csökken. Alacsony frekvenciatartományú expozíció vizsgálatok végzése nagyfeszültségű vezetékek közelében is könnyedén megvalósítható. Ez a dolgozat a jelenlegi mérési módszereket és azok megoldásának koncepcióját mutatja be.

2 Tartalomjegyzék

1	Bevezetés.....	2
3	Vezetéknélküli kapcsolatok, csatlakoztatási követelmények és jellemzők	4
3.1	UAV-k kommunikációs módjai	4
3.2	LTE és NR különbségei	5
3.3	Bázisállomások jellemzői	6
4	Drive tesztek végzése	7
4.1	Gyalogos mérések.....	7
4.2	Járművel végzett mérések.....	7
4.3	Szükséges mérőberendezések.....	8
4.4	Mért paraméterek.....	9
4.4.1	RSSI: Received Signal Strength Indicator.	9
4.4.2	RSRP: Reference Signal Received Power	9
4.4.3	SNR: Signal to Noise Ratio.....	10
4.4.4	RSRQ: Reference Signal Received Quality.	11
4.4.5	CQI.....	11
5	Drónnal végzett mérések.....	12
5.1	Teszt környezet	12
5.2	Teszt setup	12
5.3	Mérés lépései	13
6	NR bázisállomás komplex EMF vizsgálata drónnal	15
6.1	Downlink irányú kommunikáció szélessávú vizsgálati eredménye	16
6.2	Uplink irányú kommunikáció frekvenciaszelektív vizsgálati eredménye	17
6.3	Downlink irányú kommunikáció frekvenciaszelektív vizsgálati eredménye	18
7	Alacsony frekvenciatartományú EMF vizsgálat	24
8	Vizsgálati képek	27
9	Konklúzió és jövőbeni tervek.....	29
10	Irodalomjegyzék.....	32

3 Vezetéknélküli kapcsolatok, csatlakoztatási követelmények és jellemzők

3.1 UAV-k kommunikációs módjai

Az ISM sávok a rádiófrekvenciás spektrum ipari, tudományos és orvosi, felhasználásra fenntartott sávokat foglalja magába. Valamint 2,4 és 5GHz-es frekvencia tartomány a drónok kommunikációjára is használatban van. Ezeknek a frekvenciasávoknak a használata nem hatósági engedélyhez kötött, ezért előzetes bejelentés és engedélyeztetés nélkül használhatóak. A 2,45 GHz-es középfrekvenciás ISM sáv mikrohullámú sütőt, Wi-Fi-s és Bluetooth-os eszközöket is tartalmaz. Ezenkívül sok SDR-eszköz használja ezt a frekvenciasávot.

Viszont ezek a sávok azért, hogy nem engedélykötelesek, komoly kötöttségekkel rendelkeznek. Az ezeken a frekvenciákon működő eszközöknek el kell viselniük a szintén ezekben a sávokban működő egyéb eszközök által keltett jelentős elektromágneses interferenciát, ami problémákat jelenthetnek.

Drónok esetében a rádiójelek némelyike C2 azaz „Control and Command” kapcsolatokat képeznek. A C2 kapcsolat a drón repülésének vezérlésére és telemetria adatok küldésére szolgál. A drón és a pilóta közötti kommunikáció másik lényeges része a drónon megtalálható hasznos teher, vagyis a kommunikáció a drónra felszerelt különféle szenzorokkal, kamerákkal és egyéb eszközökkel, mint például egy permetező szórófeje. Figyelembe véve a hullámterjedés jellemzőit és a modulációs technikák paramétereit, a vezérlés és a telemetria adatok továbbítására, hogy optimális legyen az alacsonyabb 800MHz-es és a 2400MHz-es frekvenciasávokat alkalmazzák, míg például a kamera és a pilóta közötti adatáramlást a magasabb 5000 MHz frekvenciasávok valamelyike biztosítja. A jelütközések elkerülése érdekében az UAS-t és a távirányítót párosítani kell. A legtöbb esetben egy távirányító több UAS-hoz is párosítható. A csatlakoztatás során az adó általában a következő információkat osztja meg a vevővel:

- A személy egyedi azonosítóját (ID)
- Frequency hopping
- Pontos frekvenciakülönbség az adó és a vevő között (kristályoszillátor alapján)
- Az UAS által biztosított pontos képfrissítési gyakoriság A kapcsolat létrejötte után a kapcsolat addig tart, amíg manuálisan le nem állítják, helyi (non-failsafe) hiba nem történik, vagy a failsafe állapot be nem áll.

Failsafe hiba csatlakoztatási probléma miatt is előfordulhat, amennyiben bizonyos ideig nem érkeznek meg a telemetria csomagok. Ezt a esetet hívják Ground Station Control (GSC)

failsafe-nek. Ezekben a rendszerekben általában beállítható a telemetriai csomagok átviteli frekvenciája, esetenként a failsafe mód fennmaradásához szükséges idő. A szinkronizálási csomagok csatlakoztathatók az irányítás visszaszerzésének megkönnyítése érdekében. Failsafe állapot bekövetkezése esetén a rendszer RF módba lép, amikor vagy átugrik a lehetséges csatornákon, vagy megpróbálja visszaszerezni a kapcsolatot az eddig használt csatornán. A távirányítóról küldött adatcsomagok csatornákra vannak osztva. Ezekhez vannak hozzárendelve a karok és gombok, amelyek különböző számú pozíciót tarthatnak. Fontos, hogy a DISARM kapcsolót a lehető legmegbízhatóbban működtessük, ezért gyakrabban küldött csatornához vagy több csatornához kell hozzárendelni.

3.2 LTE és NR különbségei

1. Táblázat: LTE és NR összehasonlítás

	4G LTE	5G NR
Válaszidő	<i>10-50ms</i>	<i>1ms</i>
Max átviteli sebesség	<i>300Mbps</i>	<i>Akár 10Gbps</i>
Csatlakozások sűrűsége	<i>100k/km²</i>	<i>1M csatlakozás/km²</i>
Sávszélesség	<i>1,4-20-100MHz</i>	<i>100-800MHz</i>
Lefedettségi távolság	<i>Macrocell: 1-5 km²</i>	<i>Smallcell: <1 km² a mmWave használata miatt</i>
Frekvencia tartomány	<i>6GHz alatti tartomány</i>	<i>Akár 60GHz-es tartomány</i>
Hozzáférési technológia	<i>OFDMA</i>	<i>OFDMA</i>

Ahogy azt a táblázatban is láthatunk az az, hogy az 5G jóvalta gyorsabb lehet az elődjénél. A nagyobb sebesség mellett az 5G alacsonyabb késleltetést ígér, amely az eddigi átlagos 10 milliszekundumos LTE késleltetést 1 milliszekundumra csökkenti. Sokkal több eszköz lesz képes egy négyzetkilométeren belül a hálózatra csatlakozni. A hálózat jóval magasabb frekvenciatartományon is üzemelni fog, mint a 4G. Ezek mellett az adattovábbítási sebessége is nőni fog, akár 10 Gbps-ra. A 4 GHz feletti terjedési veszteséget részben kompenzálni fogja a Massive MIMO technológia, amely több antennát csoportosít egyetlen cellatoronyhoz. Az 5G keretein belül már a 64-től kezdődve a 256-os MIMO antenna is megvalósíthatóvá válik.

Ezek mellett szükségesnek érzem megemlíteni, hogy az LTE rendelkezik még egy Advanced és Advanced Pro szabvány kiegészítésekkel is, amelyekkel jelentősen jobb értékeket

is elérhetünk. Bizonyos tekintetben megközelíti az 5G szabványát is, de ez még mindig jóval elmarad az 5G tényleges értékeitől.

Az 5G NR-ben fontos szerepe lesz még a Carrier Aggregation, a Dynamic Spectrum Sharing, a Beamforming és Beamweeping technológiáknak, amelyek által biztosított a nagyobb nyereség és adatsebesség, valamint a kisebb interferencia elérése.

3.3 Bázisállomások jellemzői

A bázisállomásokról sok általános információt sugároz ki magáról, de ehhez speciális mérőberendezés és mérés szükséges, mivel ezeket az információkat a szolgáltatók nem adják meg csak úgy. Alapvető információkat tudhatóak meg egy bázisállomásról, például pontos koordinátái, a tengerszint feletti magasságát. Megtudható a különféle azonosítói is, mint például a TAC (Type Allocation Code), CID (Cell ID), PCI (Physical Cell Id), amelyek elengedhetetlenek a hálózat megfelelő működéséhez. Fontos információkat szolgáltatnak mind a felhasználói eszközöknek, mind a szomszédos bázisállomásoknak. Ezen kívül információkat kaphatunk az antennák típusáról, magasságáról, elektromos és fizikai dőlésszögéről, a nyaláb nyílásszögéről, valamint a rajtuk használt technológiáról és szektorokról. Például az LTE technológia a 800, 1800, 2100 és 2600 MHz-es frekvenciasávot használja. A legelterjedtebb szektorelrendezés a 3 szektor használata, ettől természetesen el lehet térni, hiszen van 1, sőt 5 szektoros bázisállomás is. Ez a lefedendő terület adottságaitól függ, a szolgáltatóknak nem feltétlenül érdeke a település határában lévő mezőgazdasági területek lefedése, így például kevesebb szektorantennát szerelnek fel a bázisállomásra így a nem kíván részek lefedését kihagyva.

4 Drive tesztek végzése

A mobilkommunikációs drivetesztek végzése a hálózat telepítésének és üzemeltetésnek egyaránt elengedhetetlen része. A mérések során olyan kulcsfontosságú elemeket vizsgálnak, amelyek által felfedezhetővé válnak a különböző meghibásodások és optimalizálási lehetőségek. Továbbá a benchmarking tesztek által olyan különböző mobilkommunikációs paramétereket is vizsgálhatnak az egyes szolgáltatók, amelyek segítségével már egy adott területre megtudják mondani annak a szolgáltatási élményét és minőségét az utólagos elemzések elvégzésével. (QoE, QoS)

4.1 Gyalogos mérések

Gyalogos méréseket jellemzően csak épületekben, esetleg gépkocsival nem megközelíthető területeken végeznek, de a hálózat megfelelőségét továbbra is ellenőrizni kell. Épület felmérésénél lehetőség van a térképbeállítások helyett az alaprajz használatára. Ez pontos képet ad az egyes helyszínek sajátosságairól a mobilkommunikáció szempontjából. Többszintes épület esetén minden szinten mérést kell végezni. Ebben az esetben az adott alaprajz minden szinthez hozzárendelhető, akár egyszintes épület esetén is. A mérés során járja be a kijelölt útvonalakat, helyiségeket. Figyelmet kell fordítani a kulcsfontosságú helyekre, például irodákra és tárgyalótermekre, ahol a megfelelő lefedettség elsőbbséget élvezhet.

4.2 Járművel végzett mérések

Az autós mérések során kétféle eljárást is megkülönböztetünk, mégpedig a dedikált bázisállomás mérést és a benchmarking tesztelést. A benchmarking mérés során egy adott útszakasz (pl. autópálya) vagy település mobilhálózati értékeit kell vizsgálni. Egy útszakasz átvizsgálása esetén a mérőautó a kijelölt szakaszon oda-vissza halad. Amennyiben egy település lefedettségi méréseit végzi a mérőautó úgy a település egészét járja be, minden utcát végig járva. Ezeket a méréseket általában időszakonként végzik el, hogy a szolgáltatók tisztában legyenek a terület hálózati minőségével, mind az általuk, mind a konkurens szolgáltatók által biztosított hálózaton. A dedikált bázisállomás mérések az állomások telepítése, vagy azon való változtatás után kerül elvégzésre. Ebben az esetben a mérőautó csak a mérendő bázisállomás által lefedett területet méri meg és így vizsgálja az adott állomás tulajdonságait. Általában ezeket a méréseket úgy végzik, hogy a bázisállomás közeléből indulnak el a mérőautóval és az első handoverig mennek. Ezt a lehető összes irányba megismétlik, így behatárolva annak az egy bizonyos bázisállomásnak a területét. Ezekre a mérésekre kifejezetten az installációk után van szükség, mivel beállítási pontatlanságok léphetnek fel, és az esetleges meghibásodások észlelhetőek ez által.



1. Ábra: Mérőtelefonok az autóban elhelyezve

4.3 Szükséges mérőberendezések

A mérések elvégzéséhez mobilhálózatokhoz használható mérőszoftverrel ellátott mérőtelefonok szükségesek. Szükség van továbbá a mobil sávok scannelésére alkalmas mérőeszközre és annak antennáira és egyéb tartozékaira. Gyalogos mérésekhez, szükséges lesz egy kifejezetten ilyen mérésekhez kialakított hátizsákra, amibe a telefon és a szkennel kerül. Amennyiben autós drive tesztet végeznek, akkor a szkennel és a telefonon kívül egy laptop és egy benchmarking eszközmanagement berendezés is szükséges, mint például a NEMO Inven modul. A készülékek adatkábelrel kommunikálnak a modullal, így a csatlakozásukhoz szükséges kábelek is elengedhetetlenek.



2. Ábra: Nemo Invex modul és scannerek

4.4 Mért paraméterek

4.4.1 RSSI: Received Signal Strength Indicator.

Az RSSI-vevő csak az OFDM-szimbólumokban megfigyelt átlagos összteljesítményt méri a 0-ás antennaport referenciaszimbólumaival (azaz egy részben lévő 0-as és 4-es OFDM-szimbólumokkal) a mérési sáv szélességben. A vevő RSSI teljes fogadott teljesítménye magában foglalja a társ csatornás kiszolgáló és nem kiszolgáló cellákból származó energiát, a szomszédos csatorna interferenciáját, a termikus zajt stb.

$$RSSI = \text{zaj} + \text{kiszolgáló cella teljesítménye} + \text{interferencia teljesítmény}.$$

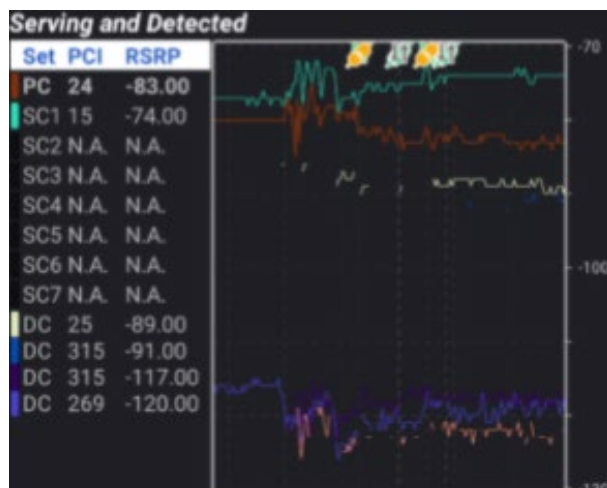
Zaj és interferencia nélkül:

$$RSSI = 12 * N * RSRP$$

N: az RSSI-n keresztüli RB-k számát mérik, és a BW-től függ.

4.4.2 RSRP: Reference Signal Received Power

Ez a mobilhálózatban vett átlagos vételi teljesítmény, amelyet az UE folyamatosan mér. A használható jel RSRP szintje általában körülbelül -44 dBm-től (a cellahely közelében) és -140 dBm-ig terjed (a cella szélén). Így az RSRP (Reference Signal Receive Power) azon erőforrás elemek (RE-k) átlagos teljesítménye, amelyek cellaspecifikus referenciajeleket (RS-ek) hordoznak a teljes sáv szélességén, így az RSRP-t csak az RS-t hordozó szimbólumokban mér.



3. Ábra: RSRP mérés eredménye

4.4.3 SNR: Signal to Noise Ratio.

Ez egy olyan mérőszám, amely összehasonlítja a vett jel szintjét a zajszinttel. Az 1:1-nél nagyobb arány, a 0 dB-nél nagyobb szám azt mutatja, hogy több a jel, mint a zaj.

The Shannon limit:

$$C = B \log_2(1 + S/N)$$

C a csatorna kapacitása bit per másodpercben. B a csatorna sávszélessége hertzben. S az átlagos vett jelteljesítmény a sávszélességen. N a zaj és az interferencia átlagos teljesítménye a sávszélességen. Az S/N (SNR) a jel/zaj viszonyt. Ezért is fontos az SNR szint, mert ha növelni akarjuk a csatorna kapacitását, akkor vagy a sávszélességet, vagy a jel-zaj viszonyt kell növelni. A frekvencia véges erőforrás, így a szolgáltató nem használhat többet, mint amennyi van. Így az SNR szintjét kell növelni a kapacitás növeléséhez. Ennek az értéknek a mérése azért is fontos, mert ez ad az UE-nek egy CQI értéket a csatornához.

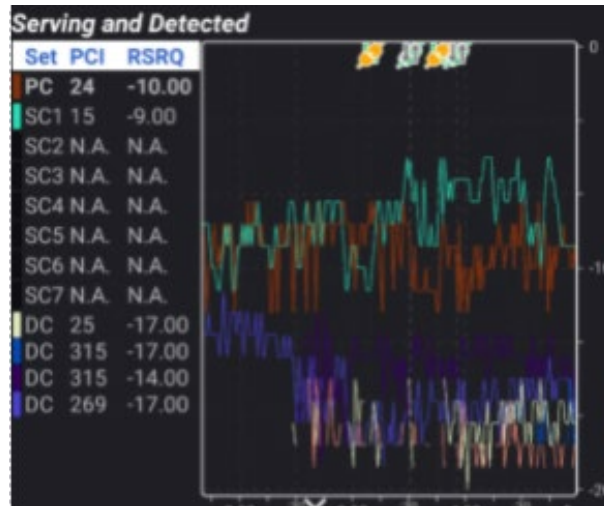


4. Ábra: SNR mérés eredménye

4.4.4 RSRQ: Reference Signal Received Quality.

Az RSRQ egy C / I típusú mérés, amely jelzi a vett referenciajel minőségét. Az RSRQ mérést tovább biztosítjuk, ha az RSRP nem elegendő megbízható átadás-átvételi vagy cella-újratárolási döntés meghozatalához. N az RB-k száma.

$$RSRQ = (N * RSRP) / RSSI$$



5. Ábra: RSRQ mérés eredménye

4.4.5 CQI

A CQI a csatorna minőségének mutatója, amely 0 és 15 közötti egész szám lehet. A 15 a legjobb csatornaminőséget, a 0 pedig a legrosszabb csatornaminőséget jelzi. Értékétől függően az UE különböző blokkmérettel továbbít adatokat. Ha a hálózat magas CQI-t kap az UE-től, akkor nagyobb szállítási blokkmérettel, ha kisebbet, akkor kisebb blokkmérettel továbbít. Ez azért fontos, mert ha a hálózat nagy szállítási blokkot küld annak ellenére, hogy az UE alacsony CQI-t, vagy az UE magas CQI-t jelez, még akkor is, ha a tényleges csatornaminőség rossz, az UE nagy valószínűséggel nem fogja tudni dekódolni a csomagot. Ez CRC hibát okoz az UE oldalán. Az UE ezután NACK üzenetet küld a hálózatnak, amelynek újra el kell küldenie azt a blokkot, amely a rádiós erőforrás pazarlását okozza.

4.4.5.1 CRC: Cyclic Redundancy Check

Ez a hiba akkor fordul elő, ha az adatok sérültek. Az összes adatból a CRC érvényesíti az eszközök által küldött információs csomagokat, és összehasonlítja azokat a kinyert adatokkal, biztosítva azok pontosságát. Ha a két érték nem egyezik pontosan, akkor CRC hiba lép fel.

5 Drónnal végzett mérések

5.1 Teszt környezet

Tesztkörnyezetként az egyetem mosonmagyaróvári karához tartozó mezőgazdasági területre és a Zala Zone tesztpályára esett a választás. Ezek rendkívül kedvező környezetek volt a méréshez, mert egyetemi területekről volt szó, közel egy bázisállomáshoz, és nem volt ember- és járműforgalom a területen így sem őket nem veszélyeztettük a drónos méréssel, valamint ők sem zavarták és veszélyeztették a mérést. A terület adottságaiból adódóan a drón több magasságban is hosszú utat tudott berepülni környezeti akadályok és egyéb veszélyek nélkül.

5.2 Teszt setup

A mérést a Nemo Handy nevű mobilhálózat tesztelésére szolgáló mérőszoftverrel végeztük. A szoftvert rootolt Samsung Galaxy S21 + 5G készüléken használták. Szükség volt egy mobil sávok scannelésére kifejlesztett eszközre is, amely a PCtel Ibflex műszere volt. A szkennerekhez két szélessávú 600 MHz-től 6 GHz-ig működő microstrip körsugárzó antennát használtunk. Eredetileg beltéri mérésekre tervezték ezeket az antennákat, de mivel a drónra szerelt eszközök súlya kiemelt fontossággal bír, ezért esett a választásunk ezekre az antennákra. Továbbá az autós drivetestekhez tervezett antennák mellett mágneses talpal, rendelkeznek, ami pedig zavarná a drón belső vezérlőrendszerét. Ezeket az eszközöket egyedi készítésű 3D-nyomtatott felfogatóeszközökkel rögzítettük a drón aljára.



6. Ábra: 3D nyomtatott felfogató rendszer digitális terve

5.3 Mérés lépései

A mérési beállítások elvégzése után csatlakoztatni kellett a scannert a mérőtelefonhoz majd el kellett indítani a megfelelő scriptet mind a scanneren mind a mérőtelefonon. A drónos mérés során a bázisállomás környezetében attól 100 méterre kezdtük meg a mérést 1,5-2 méteres magasságban. A bázisállomás körül egy kört írt le a drón folyamatosan tartva a 100 méter távolságot tőle. A kör megtétele után több magassági pontban is elvégeztük ezt a mérést 10, 20, 30, 40, 50 méteren valamint a jogszabályok által nyílt kategóriás drónos repüléseknél megengedett 120 méter magasságon is. A magasságot mindig az aktuális talajszinthez képest kell nézni mivel a drón azt veszi figyelembe. Amennyiben tereptárgy vagy egyéb akadály kerül a drón útvonalába azt horizontális vagy vertikális irányba szükséges kikerülni majd vissza kell térni az adott útvonalra.

Scanner által használt script részletei:

```
<handy_scan_cfg>
  <ScannerConfig/>
  <ScannerParameters>
    <PCTEL_NR_TOP_N_SCAN UseChannels="true" Frequency="3799.995"
Channel="647328" SubcarrierSpacing="Case C - 30kHz" SibSignaling="false"
MobilityMode="0" NumberOfSSBursts="8" Band="8388686">
      <nr_top_channel_range Stop="653266" Start="620000"/>
      <nr_top_frequency_range FreqStop="3799.995" FreqStart="3300.0"/>
    </PCTEL_NR_TOP_N_SCAN>
  </ScannerParameters>
</handy_scan_cfg>
```



7. Ábra: Drónra felszerelt mobilhálózat mérő berendezések

Mérőtelefon által használt script részletei:

```
<ScriptTemplate xmlns:xsi="http://www.w3.org/2001/XMLSchema-instance"
xsi:noNamespaceSchemaLocation="Script.xsd">
  <Product>Nemo Outdoor</Product>
  <Version>9.0.1.26</Version>
  <Repeat>1</Repeat>
  <DeviceSettings>0</DeviceSettings>
  <ScriptItems>
    <ScriptItem>
      <Loop>
        <GUID All="{535A91E1-84B2-4E32-817E-2DE83BA5892D}"/>
        <Count All="3"/>
        <Duration All="36000"/>
        <EndTime All="0:00:00"/>
        <Type All="RepeatDuration"/>
        <Ruleset/>
      </Loop>
    </ScriptItem>
    <ScriptItem>
      <Wait>
        <GUID All=""/>
        <Time All="10000"/>
        <MinTime All="0"/>
        <MaxTime All="10000"/>
        <Type All="3"/>
        <NotificationName All=""/>
        <SystemName All="LTE FDD System"/>
        <AtMostTimeCheck All="0"/>
        <AtMostTime All="300000"/>
        <EndTime All="01:00:00"/>
        <Ruleset/>
        <SynchPointTime All="30000"/>
      </Wait>
    </ScriptItem>
  </ScriptItems>
</ScriptTemplate>
```

6 NR bázisállomás komplex EMF vizsgálata drónnal

A bázisállomás melletti dombon történ a vizsgálatok elvégzése. Első körben a drón aljára felhelyeztünk egy mobilsávokat figyelő szélessávú műszert Nardalert S3-at, a drón tetejére pedig egy ugyancsak szélessávú, de sávselektív műszert egy Narda NBM 550-et helyeztünk fel. Ezzel fel szállt a drón majd 3 magasságon (10m, 25m, 45m) repült egy félkörívet oda-vissza, majd ugyanígy az állomáshoz közelebb 3 magasságon. A mérés célja, hogy lássuk mekkora a downlink és uplink expozíció a földi műszer méréseiből, a drónon levő műszerek eredményeiben pedig azt lehet látni, ahogy a drón belerepül a nyalábba az mekkora expozíció szint növekedést okoz. Ezekről a vizsgálatokról az az uplink oldalon egy Anritsu MS2720T frekvenciaszelektív mérést mutatunk be. Ezt követően egy NemoHandy-t felhelyeztünk a drónra és downlink forgalmat generáltunk folyamatosan, így 3 magasságot (10m, 25m, 45m) és egy 25m távoli oda-vissza repülést végeztünk. Ez esetben a nyaláb váltást vizsgáltuk az Anritsuval végzett frekvenciaszelektív EMF mérés alapján. A vizsgálat során látható volt a spektrum képen, hogy amíg a drón a kezdő pontban van egy teljesen átlagos térerősséget mértünk, ahogy elrepült a műszer vonalában a trafficknak megfelelő térerősség növekedés volt mérhető, majd amint tovább repült újra elfordult a műszertől a direkt nyaláb, így csökkent a mérhető expozíció.



8. Ábra: Vizsgálati helyszín

6.1 Downlink irányú kommunikáció szélessávú vizsgálati eredménye

A bázisállomás közelében végeztünk magas frekvenciatartományban EMF vizsgálatot. A mérést Nardalert S3 mérőműszerrel végeztük standalone üzemmódban, ezt egy drón segítségével juttattuk el a mérési pontokba. A vizsgálat 100 kHz – 50 GHz tartományban, 1 másodperces loggolási idővel történt, szélessávú kiértékelést használva, amit a műszer azonnal összevet a személyre vonatkozó limitekkel. A vizsgálatot több magasságon végeztük, több mérési pontban.

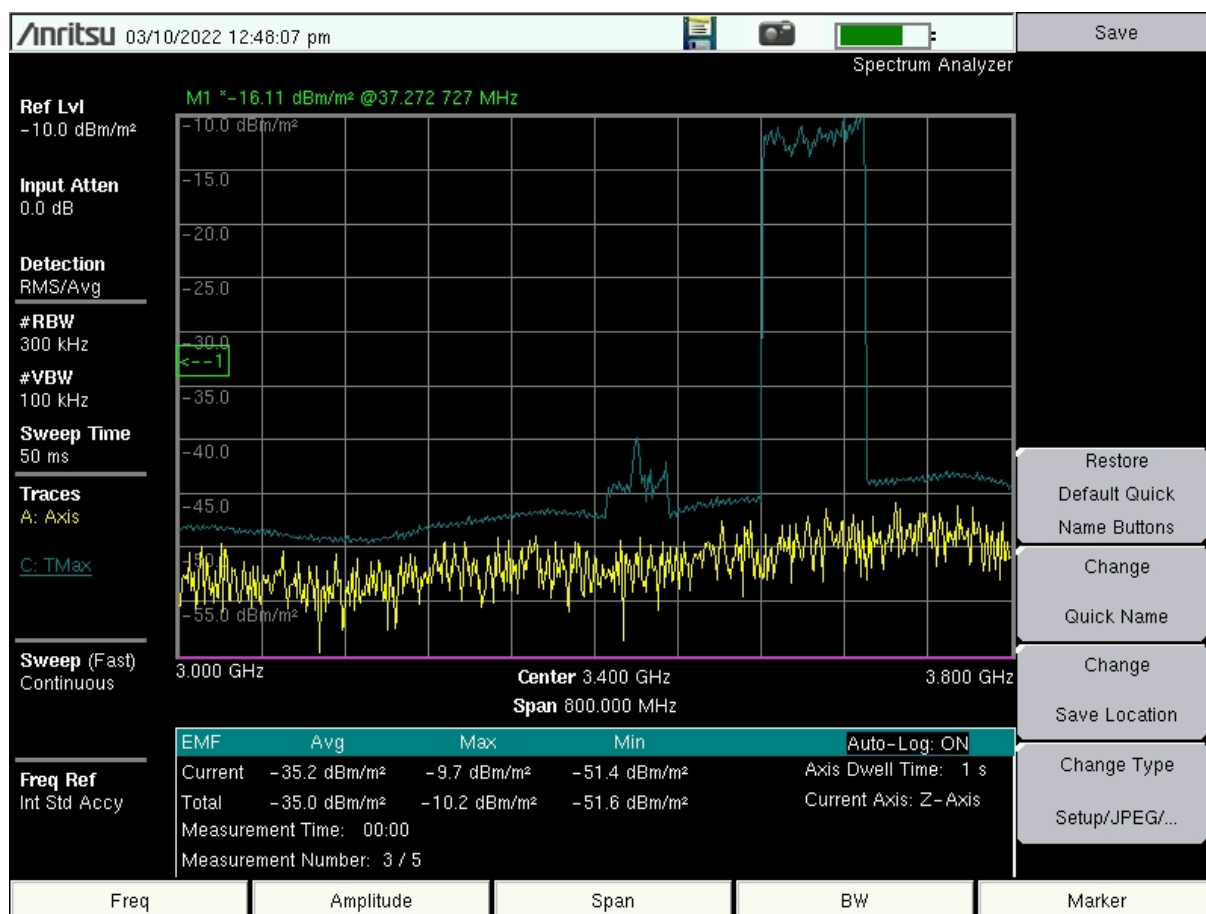


9. Ábra: Magas frekvenciatartományú szélessávú EMF vizsgálat

Vizsgálat értékelés:

A vizsgálat eredményeiből látható, hogy a maximális érték a személyi limit 20%-a. Ez az érték volt tapasztalható repülés közben a bázis állomáshoz közeli íven.

6.2 Uplink irányú kommunikáció frekvenciaszelektív vizsgálati eredménye



10. Ábra: Uplink forgalom frekvenciaszelektív vizsgálat eredményei

Vizsgálat értékelés:

A vizsgálat eredményeiből látható, hogy a maximális értékeket 3.56 – 3.66 GHz-es frekvencia tartományon mérjük, ezt is vártuk a mérés előtt. A bázisállomás 3 magasságon közép és közeli távon végzett vizsgálatait során, a műszer az uplink forgalmat gerjesztő készülék mellett 3 méterre -10.2 dBm/m^2 maximális értéket mértünk, ez 0.2 V/m felel meg. Ez jóval a sávra vonatkozó 41 V/m limit alatt helyezkedik el. Ez alapján a vizsgálat kiértékelhető értékeket ad.

Megjegyzés:

A jelen mérés során 300 kHz RBW és 100 kHz VBW használtam, a további mérés folyamán ezt lecsökkentettem az RBW értékét 30 kHz a VBW értékét 10 kHz-re ezzel már a 30 kHz-es alvivő távolságnak megfelelő felbontásban végezhető a mérés. A mérés pontossága ezzel javul, azonban műszer oldalról jóval nagyobb igénybevételt jelent és mivel számunkra jelen esetben nem az a fontos, hogy melyik alvivő mekkora expozícióval szerepel, hanem a sáv mekkora expozíciót okoz, ezért nem szükségeszerű a csökkentett felbontási sávszélesség használata.

6.3 Downlink irányú kommunikáció frekvenciaszelektív vizsgálati eredménye

2. Táblázat: Beamsweeping frekvenciatartományú EMF vizsgálata, direkt nyaláb nélkül

Point_Num	Amplitude(dBm/m _e)	Frequency(MHz)
P_385	-56.23	3560.000000
P_386	-30.87	3561.454545
P_387	-27.08	3562.909091
P_388	-27.36	3564.363636
P_389	-31.72	3565.818182
P_390	-31.94	3567.272727
P_391	-31.35	3568.727273
P_392	-30.16	3570.181818
P_393	-28.86	3571.636364
P_394	-30.77	3573.090909
P_395	-34.32	3574.545455
P_396	-33.77	3576.000000
P_397	-30.55	3577.454545
P_398	-27.46	3578.909091
P_399	-27.35	3580.363636
P_400	-28.01	3581.818182
P_401	-30.40	3583.272727
P_402	-30.52	3584.727273
P_403	-30.11	3586.181818
P_404	-29.99	3587.636364
P_405	-28.04	3589.090909
P_406	-27.27	3590.545455
P_407	-26.35	3592.000000
P_408	-25.67	3593.454545
P_409	-27.15	3594.909091
P_410	-25.32	3596.363636
P_411	-24.43	3597.818182
P_412	-24.30	3599.272727
P_413	-29.48	3600.727273
P_414	-29.03	3602.181818
P_415	-28.19	3603.636364
P_416	-28.63	3605.090909
P_417	-34.62	3606.545455
P_418	-33.86	3608.000000
P_419	-34.27	3609.454545
P_420	-34.05	3610.909091
P_421	-34.75	3612.363636
P_422	-35.01	3613.818182
P_423	-33.92	3615.272727
P_424	-34.13	3616.727273

P_425	-27.27	3618.181818
P_426	-26.82	3619.636364
P_427	-26.25	3621.090909
P_428	-26.30	3622.545455
P_429	-26.41	3624.000000
P_430	-27.04	3625.454545
P_431	-26.71	3626.909091
P_432	-26.14	3628.363636
P_433	-25.80	3629.818182
P_434	-24.83	3631.272727
P_435	-24.75	3632.727273
P_436	-24.86	3634.181818
P_437	-26.03	3635.636364
P_438	-26.26	3637.090909
P_439	-25.75	3638.545455
P_440	-25.73	3640.000000
P_441	-27.55	3641.454545
P_442	-29.52	3642.909091
P_443	-28.91	3644.363636
P_444	-28.69	3645.818182
P_445	-30.63	3647.272727
P_446	-30.57	3648.727273
P_447	-30.80	3650.181818
P_448	-30.89	3651.636364
P_449	-29.84	3653.090909
P_450	-29.71	3654.545455
P_451	-29.07	3656.000000
P_452	-29.11	3657.454545
P_453	-30.88	3658.909091

3. Táblázat: Beamsweeping frekvenciatartományú EMF vizsgálata, direkt nyaláb vonalában

Point_Num	Amplitude(dBm/m _e)	Frequency(MHz)
P_386	-25.73	3561.454545
P_387	-22.07	3562.909091
P_388	-22.72	3564.363636
P_389	-24.70	3565.818182
P_390	-24.43	3567.272727
P_391	-23.82	3568.727273
P_392	-23.06	3570.181818
P_393	-23.26	3571.636364
P_394	-23.12	3573.090909
P_395	-22.56	3574.545455
P_396	-22.70	3576.000000
P_397	-22.24	3577.454545
P_398	-21.84	3578.909091
P_399	-21.83	3580.363636

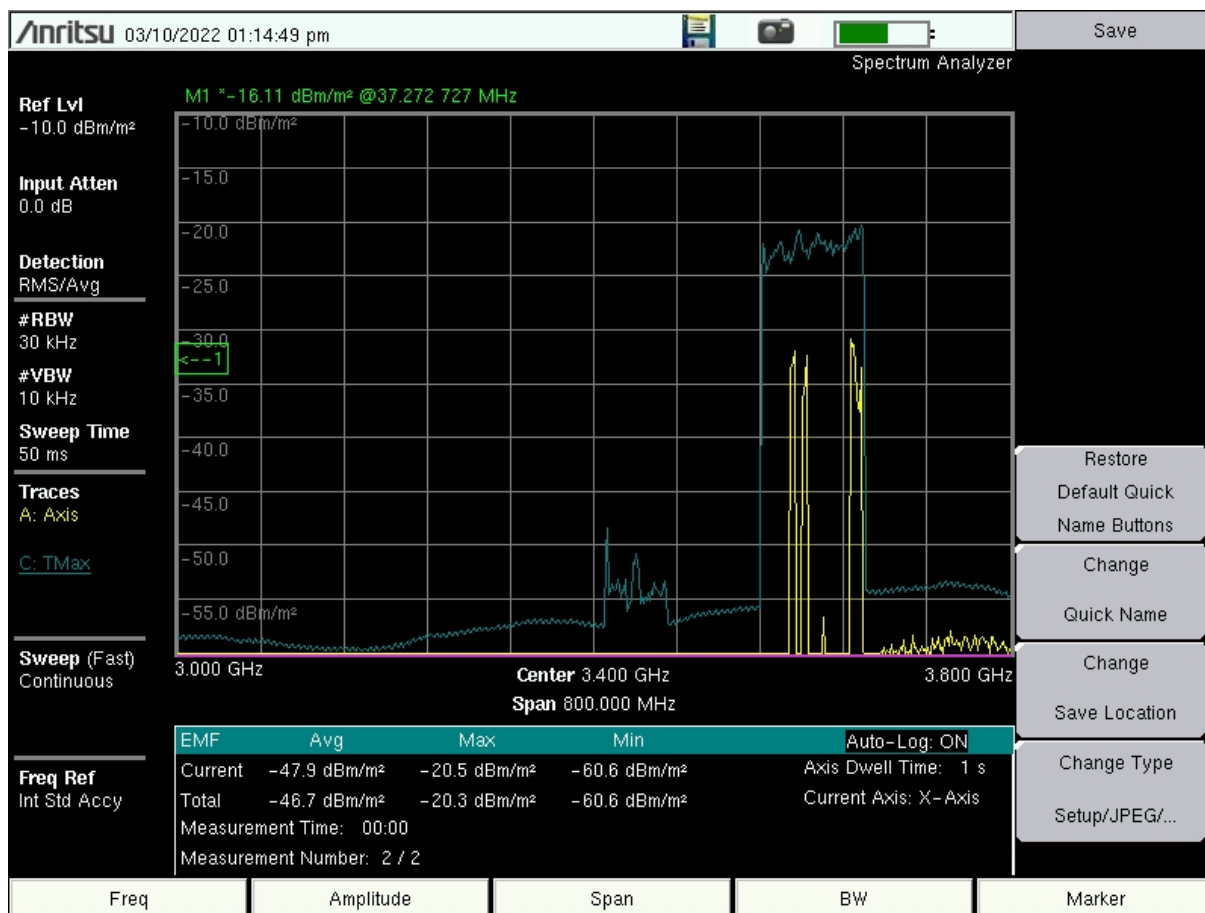
P_400	-22.48	3581.818182
P_401	-23.58	3583.272727
P_402	-23.53	3584.727273
P_403	-23.40	3586.181818
P_404	-22.74	3587.636364
P_405	-23.78	3589.090909
P_406	-23.58	3590.545455
P_407	-22.93	3592.000000
P_408	-22.25	3593.454545
P_409	-21.63	3594.909091
P_410	-20.92	3596.363636
P_411	-20.79	3597.818182
P_412	-21.29	3599.272727
P_413	-22.51	3600.727273
P_414	-22.74	3602.181818
P_415	-22.64	3603.636364
P_416	-22.64	3605.090909
P_417	-23.40	3606.545455
P_418	-22.87	3608.000000
P_419	-22.04	3609.454545
P_420	-21.82	3610.909091
P_421	-22.27	3612.363636
P_422	-21.88	3613.818182
P_423	-20.98	3615.272727
P_424	-21.14	3616.727273
P_425	-21.97	3618.181818
P_426	-22.00	3619.636364
P_427	-22.02	3621.090909
P_428	-21.77	3622.545455
P_429	-22.75	3624.000000
P_430	-22.63	3625.454545
P_431	-22.19	3626.909091
P_432	-21.69	3628.363636
P_433	-23.15	3629.818182
P_434	-22.67	3631.272727
P_435	-22.16	3632.727273
P_436	-22.16	3634.181818
P_437	-22.54	3635.636364
P_438	-22.35	3637.090909
P_439	-22.17	3638.545455
P_440	-22.06	3640.000000
P_441	-22.75	3641.454545
P_442	-22.33	3642.909091
P_443	-21.94	3644.363636
P_444	-21.36	3645.818182
P_445	-21.87	3647.272727

P_446	-21.14	3648.727273
P_447	-21.02	3650.181818
P_448	-20.54	3651.636364
P_449	-21.65	3653.090909
P_450	-21.58	3654.545455
P_451	-20.87	3656.000000
P_452	-20.26	3657.454545
P_453	-20.78	3658.909091
P_454	-29.21	3660.363636

4. Táblázat: Beamsweeping frekvenciatartományú EMF vizsgálata, direkt nyaláb nélkül

Point_Num	Amplitude(dBm/m _e)	Frequency(MHz)
P_385	-56.49	3560.000000
P_386	-41.65	3561.454545
P_387	-38.09	3562.909091
P_388	-38.43	3564.363636
P_389	-31.01	3565.818182
P_390	-30.83	3567.272727
P_391	-29.14	3568.727273
P_392	-29.00	3570.181818
P_393	-35.41	3571.636364
P_394	-38.56	3573.090909
P_395	-47.23	3574.545455
P_396	-47.57	3576.000000
P_397	-41.98	3577.454545
P_398	-41.53	3578.909091
P_399	-40.24	3580.363636
P_400	-40.68	3581.818182
P_401	-32.15	3583.272727
P_402	-32.12	3584.727273
P_403	-31.47	3586.181818
P_404	-31.66	3587.636364
P_405	-32.77	3589.090909
P_406	-32.67	3590.545455
P_407	-32.22	3592.000000
P_408	-32.34	3593.454545
P_409	-51.43	3594.909091
P_410	-52.21	3596.363636
P_411	-50.43	3597.818182
P_412	-48.75	3599.272727
P_413	-36.83	3600.727273
P_414	-39.70	3602.181818
P_415	-38.33	3603.636364
P_416	-37.58	3605.090909
P_417	-38.43	3606.545455
P_418	-37.99	3608.000000

P_419	-37.65	3609.454545
P_420	-37.84	3610.909091
P_421	-46.17	3612.363636
P_422	-46.09	3613.818182
P_423	-45.48	3615.272727
P_424	-45.55	3616.727273
P_425	-32.21	3618.181818
P_426	-32.33	3619.636364
P_427	-32.31	3621.090909
P_428	-31.94	3622.545455
P_429	-33.31	3624.000000
P_430	-32.90	3625.454545
P_431	-33.00	3626.909091
P_432	-32.58	3628.363636
P_433	-37.62	3629.818182
P_434	-37.92	3631.272727
P_435	-36.91	3632.727273
P_436	-37.98	3634.181818
P_437	-31.99	3635.636364
P_438	-31.73	3637.090909
P_439	-31.14	3638.545455
P_440	-31.03	3640.000000
P_441	-38.93	3641.454545
P_442	-36.48	3642.909091
P_443	-36.93	3644.363636
P_444	-36.90	3645.818182
P_445	-30.52	3647.272727
P_446	-29.97	3648.727273
P_447	-29.79	3650.181818
P_448	-30.19	3651.636364
P_449	-34.69	3653.090909
P_450	-34.47	3654.545455
P_451	-33.68	3656.000000
P_452	-33.79	3657.454545
P_453	-40.66	3658.909091
P_454	-50.55	3660.363636



11. Ábra: Beamsweeping frekvenciaszelektív vizsgálat eredményei

Vizsgálat értékelés:

A vizsgálat eredményeiből látható, hogy a maximális értékeket 3.56 – 3.66 GHz-es frekvencia tartományon mérjük, a mérés során látható volt a forgalom okozta térerősség szint növekedés miközben a drón egyvonalba került a műszerrel, majd tovább haladva újra lecsökkent a mért térerősség értéke, ezt is vártuk a mérés előtt. Ezentúl a táblázat eredményeiből látható, hogy a direkt nyaláb vonalában a forgalom hatására a teljes 100 MHz-es sáv térerősség értéke maximális, míg anélkül mind a spektrum terhelés és a maximális térerősség is lecsökken. A bázisállomás 3 magasságon közép és közeli távon végzett vizsgálatai során, a műszer a drónon gerjesztett downlink forgalom által gerjesztett nyalábot vizsgálta. A vizsgálat során -20.3 dBm/m² maximális értéket mértünk, ez 0.06 V/m felel meg. Ez jóval a sávra vonatkozó 41 V/m limit alatt helyezkedik el. Ez alapján a vizsgálat kiértékelhető értékeket ad.

7 Alacsony frekvenciatartományú EMF vizsgálat

A távvezeték közelében, közvetlen alatta és felette végeztünk alacsony frekvenciatartományban EMF vizsgálatot. A mérést Narda EHP-50F mérőműszerrel végeztük standalone üzemmódban, ezt egy drón segítségével juttattuk el a mérési pontokba. A vizsgálat 20 Hz – 2 kHz tartományban, 30 másodperces loggolási idővel történt, főként az 50 Hz komponens és felharmonikusainak értékét figyeltük. A vizsgálatot több magasságon végeztük, több mérési pontban minden pontban legalább 1 percet állva.

Vizsgálat eredménye:

5. Táblázat: Alacsony frekvenciatartományú EMF vizsgálat összesített táblázat

RMS WX	RMS WY	RMS WZ	RMS WT
V/m	V/m	V/m	V/m
37.139	29.996	164.831	171.605
AVG WX	AVG WY	AVG WZ	AVG WT
V/m	V/m	V/m	V/m
9.796	7.141	37.163	39.269
MAX WX	MAX WY	MAX WZ	MAX WT
V/m	V/m	V/m	V/m
290.068	250.611	1353.63	1406.862
14:39:30	14:39:30	14:39:30	14:39:30
RMS HX	RMS HY	RMS HZ	RMS HT
V/m	V/m	V/m	V/m
37.127	29.971	164.748	179.59
AVG HX	AVG HY	AVG HZ	AVG HT
V/m	V/m	V/m	V/m
9.686	7.031	36.894	42.443
MAX HX	MAX HY	MAX HZ	MAX HT
V/m	V/m	V/m	V/m
290.068	250.611	1352.073	1405.363

6. Táblázat: Alacsony frekvenciatarományú EMF vizsgálat összes érték

Id	Time	Wide X	Wide Y	Wide Z	Wide T	High X	High Y	High Z	High T	Frequency
	V/m	V/m	V/m	V/m	V/m	V/m	V/m	V/m	V/m	Hz
	Távvezeték mérés kezdése 6m magasan									
1	14:34:00	13.092	8.79	45.342	48.006	13.077	8.78	45.342	48	50
2	14:34:30	13.062	8.8	45.29	47.95	13.062	8.77	45.238	47.895	50
3	14:35:00	10.839	4.581	23.415	26.206	10.765	4.32	23.094	25.843	50
4	14:35:30	10.162	6.39	28.94	31.331	10.116	6.223	28.94	31.282	50
5	14:36:00	10.74	5.97	31.696	33.994	10.629	5.788	31.189	33.455	50
6	14:36:30	5.922	5.553	28.94	30.057	5.828	5.346	28.741	29.809	50
7	14:37:00	5.508	5.339	28.51	29.524	5.383	5.082	28.347	29.297	50
8	14:37:30	6.958	6.966	33.42	34.84	6.847	6.761	33.189	34.556	50
	Távvezeték alatt 4m magasan									
9	14:38:00	17.559	8.71	47.261	51.164	17.559	8.71	47.044	50.963	50
10	14:38:30	86.896	43.501	220.546	241.006	86.796	43.451	220.546	240.961	50
11	14:39:00	263.937	230.144	1250.259	1298.375	263.937	229.879	1250.259	1298.328	50
12	14:39:30	290.068	250.611	1353.63	1406.862	290.068	250.611	1352.073	1405.363	50
13	14:40:00	278.612	224.13	1298.674	1347.001	278.612	224.13	1298.674	1347.001	50
	Távvezeték túlmegy 4m magasan									
14	14:40:30	36.266	30.655	192.975	198.731	36.183	30.549	192.975	198.7	50
15	14:41:00	32.999	27.606	184.502	189.451	32.999	27.542	184.077	189.029	50
16	14:41:30	30.549	26.516	179.473	183.976	30.409	26.516	178.855	183.349	50
	Távvezeték túl felemelkedik 30m magasan									
17	14:42:00	25.645	14.894	66.298	72.628	25.645	14.808	66.298	72.611	50
18	14:42:30	21.903	12.735	61.094	66.139	21.802	12.633	61.094	66.086	50
19	14:43:00	21.281	12.706	60.813	65.671	21.257	12.531	60.534	65.37	50
20	14:43:30	19.611	12.274	74.645	78.148	19.498	12.19	74.645	78.107	50
21	14:44:00	23.659	11.981	61.306	66.796	23.659	11.899	61.306	66.781	50
	Távvezeték felett 20m magasan									
22	14:44:30	28.087	13.932	75.509	81.759	27.925	13.677	75.336	81.501	50
23	14:45:00	121.199	80.91	424.131	448.467	121.199	80.631	423.643	447.955	50
24	14:45:30	128.381	86	442.079	468.307	128.381	85.901	442.079	468.289	50
25	14:46:00	122.039	81.096	425.109	449.653	121.899	81.003	425.109	449.598	50
	Távvezeték kiinduló oldal 30m magasan									
26	14:46:30	9.473	4.345	17.438	20.315	9.343	4.05	16.634	19.504	50
27	14:47:00	5.565	3.404	13.062	14.6	5.303	3.087	11.749	13.255	55
	Távvezeték kiinduló oldal 20m magasan									
28	14:47:30	5.702	3.536	14.454	15.936	5.383	2.685	13.335	14.629	50
29	14:48:00	9.462	4.207	17.783	20.578	9.236	4.004	16.885	19.658	55
30	14:48:30	9.795	4.416	20.797	23.408	9.672	4.055	20.441	22.974	50
31	14:49:00	9.473	4.597	18.26	21.079	9.343	4.193	17.438	20.223	50
	Távvezeték kiinduló oldal 4m magasan									
32	14:49:30	11.94	6.074	32.285	34.954	11.858	5.861	31.805	34.446	50
33	14:50:00	11.285	6.486	34.914	37.261	11.194	6.331	34.674	36.982	50

34	14:50:30	11.402	6.288	33.381	35.831	11.324	6.152	33.189	35.604	50
35	14:51:00	10.864	5.808	37.025	39.021	10.765	5.636	36.771	38.726	50
36	14:51:30	8.64	3.516	18.429	20.655	8.64	3.467	18.429	20.647	50
37	14:52:00	1.578	2.67	2.682	4.1	1.578	2.67	2.682	4.1	400

Vizsgálat értékelés:

A vizsgálat eredményeiből látható, hogy a maximális értékeket 50 Hz-es frekvencián mérjük, ezt is vártuk a mérés előtt. A távvezetéken kívül az épület felé 6 méter magasan 30-40 V/m értékeket mértünk. A távvezeték alatt közvetlen 4 méter magasan mértük a maximális értéket ez 1405 V/m. Ezt követően túl repülve a távvezetéken a mért értékek nem egyeznek a kiindulópontban mért értékekkel. Itt 190 V/m-es értékeket mértünk, ez körülbelül 5 szöröse a kezdeti pontban mért értékeknek. Ezt okozhatja, hogy a kezdő pont távolsága nagyobb a távvezetékétől, mint a túlsó pont távolsága. Ezt követően túl mértünk 30 méter magasan itt 70 V/m körüli értékeket tapasztaltunk. Ezt követően a távvezeték felett mértünk 20 méter magasan 450 V/m körüli értékeket. Ez körülbelül a harmada az alatta 4 méteren mért értékeknek, ezt is okozhatja a különböző távolság a két mérési pont között. A vizsgálat végi kiinduló 4 méter magasan végzett mérések és a kezdeti 6 méter magasan végzett értékek közel egyeznek, természetesen a 6 méteres pont közelebbi a vezetékhöz ezért itt a mért értékek is magasabbak. Ez alapján a vizsgálat kiértékelhető értékeket ad.

Megjegyzés:

A további mérések során fontos előre pontosan definiálni a mérési magasságokat és a vezetéktől tartott távolságot. Ezekben a pontokban körbe mérve a vezetéket, teljesen pontos és megbízható értékeket kaphatunk. Szükség lehet a drón 50 Hz-en kibocsátott zajszintjére, ha ez sokkal alacsonyabb, mint a távvezeték értékei ez esetben nem folyásolja be a mérés végeredményét.

8 Vizsgálati képek



12. Ábra: Vizsgálat elvégzéséhez használt légitjármű és műszerek



13. Ábra: Uplink/downlink forgalom expozíció vizsgálat



14. Ábra: Nyaláb váltás, beamsweeping vizsgálat Anritsu MS2720T és Narda SRM-3006



15. Ábra: Vizsgálat elvégzéséhez használt légitjármű és műszerek

9 Konklúzió és jövőbeni tervek

Az eddigi esztek kiválóak voltak abból a szempontból, hogy megmutatták a számunkra milyen irányokban is kell tovább fejlesztenünk a mérési eljárásokat a pontosabb mérések elvégzésének érdekében. További mérések még tervezettek, hogy pontosabb és átláthatóbb képet kaphassunk a drónok által biztosított mérési képességekről. Például az összehasonlíthatóság érdekében különböző típusú területeken kell méréseket végezni. Így megtudjuk, milyen változtatásokra lehet szükség a különböző térbeli adottságokkal rendelkező helyeken ahhoz, hogy a mérés sikeres legyen. Az eddigi mérési helyszínek abból a szempontból voltak optimálisak, hogy nem voltak zavaró tényezők viszont ez más területeken nagyrészt nem lesz adott a számunkra. Így tehát szükség lesz egy olyan eljárástípus kidolgozására is, ahol a mérést emberi, jármű- vagy épületakadályokkal rendelkező területen, például városban kell elvégezni. A mérési útvonalak terén is fejlesztésekre van szükség, mivel az első mérések során csak egy véletlenszerű pontokat választottunk ki a bázisállomástól távol, ahol a drón egyszerű körpályán repülhet. A tapasztalatok azt mutatják, hogy a méréseket több különböző sugarú körben érdemes megtenni a bázisállomás körül.

A mérések során olyan tapasztalatokat is szereztünk, amelyek lehetővé teszik, hogy a hálózat minőségéből kisebb-nagyobb következtetéseket vonjunk le a föld feletti különböző légrétegek szintjén. Például az antennák magasságában akár több kilométerre található bázisállomás jele is érzékelhető. Továbbá, annak ellenére, hogy az eszköz jó RSRP-szintekkel rendelkezik ezeken a magasságokon, az SNR-szint viszont meglehetősen gyenge, egyes esetekben akár -20 dB-t is elérhet. Azaz elég zajos ez a magasság a mért frekvenciasávokban. Ez annak köszönhető, hogy ilyen magasságokon, nincsenek már tereptárgyak így a jelzések akadálytalanul tudnak terjedni. Ezáltal viszont, hogy több kilométerre levő bázisállomások jelzései is megtalálhatóak a magasabb légrétegekben komoly interferenciát okoz.

A vizsgálatok során a limiteknek megfelelő értékeket tapasztaltunk mind a mobilsávokban és alacsony frekvenciatartományban egyaránt. A drón segítségével a terepviszonyoktól függetlenül képesek vagyunk elvégezni a méréseket, akár közel a távvezetékhez vagy bázisállomáshoz, így anélkül tudjuk meghatározni a védőtávolságot, ahol a limitek már teljesülnek, hogy akár a mérés idejére embernek kellene itt tartózkodnia. Ezenfelül jóval gyorsabb, egyszerűbb és költséghatékonyabb a vizsgálatok elvégzése, mert nincs szükség mászó eszközökre, külön képzett ipari alpinista személyre, aki a bázisállomás közvetlen közelében a mérést elvégezné, vagy emelőkosárra, amivel megtudjuk közelíteni a távvezetékét.

A vizsgálat eredményeiből szimulálható a távvezetékek körüli expozíció értéke és eloszlása egy kétdimenziós kör felületen vagy akár egy háromdimenziós gömbön. Ezeket a szimulációkat validálva a helyszíni mérésekkel a jövőben lehetséges a vizsgálatok kiváltása szimulációval. A mobil bázisállomás vizsgálata főként az NR 3,5 GHz-es frekvencia sávjára vonatkozott. Ez esetben is a mérések során minden esetben a limiteknek megfelelő értéket kaptunk, mind a földön végzett mérések és a drónnal az állomás közelében végzett mérések során egyaránt. A vizsgálat során ki mértük a beamforming hatását az adott pozícióban mérhető expozíció értékekre, ez esetben mérhető volt, ahogy a bázisállomás által létrehozott keskeny nyaláb a drónon elhelyezett forgalmazó eszközre irányul. Látható, hogy amikor a drón és a forgalmazó eszköz a műszertől távol helyezkedik el alacsonyabb a Signaling folyamatnak megfelelő átlagos teljesítménysűrűség mérhető, azonban mikor a drón és a forgalmazó eszköz a mérőműszerrel egyvonalba kerül egy magasabb teljesítménysűrűségű nyaláb értékei mérhetők. Ezzel képet kapunk arról, hogy forgalommentes és forgalomterhelt esetben milyen expozíciós értékeket mutat egy 5G bázisállomás. A jövőben ezen mérések alapján is készíthető szimuláció a bázisállomások sugárzásikarakterisztikájáról, amelyeket ezen helyszíni mérésekkel validálhatunk, így később megbízhatóbb és pontosabb szimulációkat készíthetünk a bázisállomások expozíciójáról. Ezekkel javítva a jövőbeni vizsgálatok pontosságát, gyorsaságát és költséghatékonyságát.

Szükség lesz még hardveres fejlesztésekre is, mint például a scannerhez tartozó microstrip antennák kiváltása, mivel ezek jelenleg túl nagyok és formatervezésileg sem megfelelő a tokozásuk. Ez egy drónos művelet esetén több okból is kritikus rizikófaktor, mivel nagyobb szélben ezek kvázi „vitorlaként” funkcionálnak. Amely ebben az esetben jóval csökkenti az akkumulátorokkal végezhető repülési időt, mivel a nagy légellenállás következtében a motoroknak sokkal többet kell korrigálnia. Továbbá a nagyobb szellőkések akár fel is boríthatják a drónokat vagy repképtelenné teheti azokat, amelyek így veszélyeztethetik a környezetüket amellet, hogy egy becsapódás következménye képpen többmilliós károkat okozva a drónokban és a mérőműszerekben is. Egy univerzális 3D nyomtatott felfogató rendszer újra tervezése és kialakítása is elengedhetetlen a számunkra mivel a jelenlegi felfogató eszközök, csak korlátozottan sok kompromisszummal használható. A felfogató rendszer javításával csökkenthető lenne a mérések előtti összeszerelési idő valamint felhasználóbarát lenne. Továbbá így lehetőség nyílna még több különböző mérőműszer drónra való felhelyezésére. Egyik célunk ezzel a rendszer kialakításával, hogy az eddig körülményesen járművekkel, vagy gyalogosan vizsgálható méréseket kiegészítsük a drónos mérési

rendszerekkel. Ezáltal új dimenzió nyílhat meg e mérések tekintetében. Az eddigi kétdimenziós koordinátarendszer helyett, most már egy háromdimenziós térben is képesek leszünk vizsgálatokat végezni, valamint különböző eszközökkel leszünk képesek ezeket a méréseket elvégezni, lehet az spektrum analizátor, lidar, mobilhálózat analizátor, hőkamera, vagy akár egy egyszerű kamera speciális optikai felismerő szoftverrel támogatva. Például bázisállomásokat könnyedén lehetne felmérni ezzel a módszerrel egy egyszerű kamera által, így időt, pénzt és emberi erőforrást spórolva azzal, hogy nem kell egy képzett alpinista személynek az állomásra felmenni és megvizsgálni azt. Így kiderülhetnének esetleges meghibásodások (például elszakadt egy vezeték, rozsdásodik a tartószerkezet) vagy fejlesztési opciók. Ezenfelül az ipar folyamatosan újabb és újabb ötletekkel, igényekkel áll elő, amelyeknek meg kell felelni és teljesíteni kell azokat. Egy ilyen szűk piaci helyzetben pedig elengedhetetlen, hogy már előre rendelkezünk kész ötletekkel és megvalósításokkal minden téren, hogy az esetleges változtatásokat könnyedén tudjuk adaptálni így egy piaci előnyt kialakítva. Hiszen ezekkel a drónokkal rengeteg dolog megvalósítható, ami emberi erőforrás bevonásával is megoldható lenne, de ez jóval biztonságosabb, gyorsabb és költséghatékonyabb.

Felmerülhet a kérdés még így is, hogy az elvégzett mobilhálózat vizsgálása ilyen magasságokban miért releváns, hiszen nem életszerű, hogy ott huzamosabb ideig ember tartózkodjon bármilyen eshetőség miatt. Viszont itt szeretnék visszautalni a dolgozat elejére, mivel ott taglalva volt, a drónok kommunikációja. Jelenleg az ISM sávokban kommunikálnak, viszont ezek nem túl megbízhatóak egy komolyabb autonóm repülés végrehajtásához. Ahogy az itthoni és külföldi tendenciák mutatják a drónos iparág arrafele tart, hogy mindennemű kommunikációt a drónok és az irányítás között a mobilkommunikációs hálózatra szeretnék átültetni. Ez több téren is komoly előnyt jelentene, hiszen hatóságilag és szolgáltatók által ellenőrzött frekvenciasávokat használnak, stabilabb jelerősség és nagyobb jelzaj viszony érhető el ezekben a sávokban.

A jelen koncepciók arra irányulnak, hogy városokban légifolyosókat nyitnának autonóm drónos műveletek végzésére, ehhez pedig elengedhetetlen a mobilhálózatok által nyújtott nagy megbízhatóság és rendelkezésre állás. Ezekben a légifolyosókban a drónok automatán tudnának repülni A pontból B-be és egymás között biztonságosan haladnának, mivel megfelelő jelzésváltásokat tudnak folytatni a számukra is biztosított mobilhálózatokban. Ezeknek a folyosóknak kialakításához, amelyek teljes mértékben le vannak fedve bizonyos szolgáltató által elengedhetetlen, hogy vizsgáljuk és megmérjük annak különböző paramétereit.

10 Irodalomjegyzék

- [1] Walter, „A digitális műsorszórás alapjai,” 2005.
- [2] Fahad, „Method Analysis For The Measurement Of Electromagnetic Field From LTE Base Stations,” 2017.
- [3] Sergey, „Measurment Techniques,” 2020.
- [4] Cetin and Mutlu, „Comprehensive radiofrequency electromagnetic field measurements and assessments: a city center example,” 2020.
- [5] Matthias, „Measuring RF Electromagnetic Fields,” 2019.
- [6] Magyar Szabványügyi Testület, „MSZ EN 62232:2018 Determination of RF field strength, power density and SAR in vicinity of radiocommunication base station for the purpose of evaluating human exposure,” 2018.
- [7] Gajsek et. al., „Mathematical Modeling of EMF Energy Absorption in Biological Systems,” 2003.
- [8] Reiner, „5G EMF Measurment Aspects,” 2020.
- [9] IEEE Access, „A Theoretical and Experimental Investigation on the Measurement of the Electromagnetic Field Level Radiated by 5G Base Stations,” 2020.
- [10] Helth Phys, „ICNIRP Guidelines For Limiting Exposure to Electromagnetic Fields (100kHz to 300GHz),” 2020.
- [11] International Electrotechnical Comission, „prEN IEC 62232:2021 Determination of RF field strength, power density and SAR in the vicinity of radiocommunication base stations for the purpose of evaluating human exposure,” 2021.
- [12] IEEE Access, „A Comparison Between Measured and Computed Assessments of the RF Exposure Compliance Boundary of an In-Situ Radio Base Station Massive MIMO Antenna,” 2019.
- [13] Deniele et. al., „A Comparison Between Measured and Computed Assessments of the RF Exposure Compliance Boundary of an In-Situ Radio Base Station Massive MIMO Antenna,” 2020.
- [14] Narda Safety Test Solutions GmbH, „Nardalert S3 Operating Manual,” 2019.
- [15] Narda, „5G in a Nutshell,” 2020.

- [16] Stratakis et. al., „Measurements on Modern Wireless Communication Technologies and Estimation of Human Exposure,” 2014.
- [17] J. R. Todd Koelling, „Exploring 5G Fronthaul Network Architecture Intelligence Splits and Connectivity,” 2018.
- [18] A. T. T. N. Harri Holma, „5G Technology, 3GPP New Radio,” Wiley, 2020.
- [19] J. L. M. R. C. G. K. Minsig Han, „Dynamic Bandwidth Part Allocation in 5G Ultra Reliable Low Latency Communication for Unmanned Aerial Vehicles with High Data Rate Traffic,” MDPI, 2021.
- [20] Samsung, „Dynamic Spectrum Sharing,” 2021.
- [21] AMTA, „5G and EMF Explained,” 2019.
- [22] Verkotan, „5G Wireless and Beamforming Antenna Measurements at Verkotan,” 2018.
- [23] H. P. & H. M. Paul Newson, „Massive MIMO and beamforming are critical elements of 5G technology. Programmable logic is one way to enable both,” EDN Asia, 2018.
- [24] I. C. Jeongho Jeon, „NR Wide Bandwidth Operations,” IEEE Communications Magazine, 2017.
- [25] Qualcomm, „What's in the future of 5G millimeter wave?,” 2021.
- [26] D. Ahmed, „Review and analysis of local multipoint distribution system (LMDS) to deliver voice, data, internet, and video services,” International Journal of Engineering Science and Technology, 2009.
- [27] Keysight Technologies Finland, Ltd., „Keysight Nemo Handy User Guide,” 2017.
- [28] ITU, „Mobile Network Codes (MNC) for the international identification plan for public networks and subscriptions,” 2018.
- [29] ETSI, „Transmission and Multiplexing (TM); Time Division Duplex (TDD) in Point-to-Multipoint (P-MP) Fixed Wireless Access (FWA) systems; Characteristics and network applications,” 2001.
- [30] 3GPP, „5G;NR;User Equipment (UE) radio transmission and reception;Part 1: Range 1 Standalone,” 2018.
- [31] 3GPP, „5G; 5GS; User Equipment (UE) conformance specification; Part 1: Common test environment,” 2019.
- [32] 3GPP, „LTE; Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Requirements for support of radio resource management,” 2016.

- [33] N. I. B. H. M. N. H. M. S. A. M. R. Mohammad T. Kawser, „Downlink SNR to CQI Mapping for Different Multiple Antenna Techniques in LTE,” International Journal of Information and Electronics Engineering, 2012.
- [34] S. Tabbane, „4G to 5G networks and standard releases,” 2019.
- [35] 3GPP, „5G; NR; Physical channels and modulation,” 2018.
- [36] S. Kumawat, „5G NR Sounding Reference Signal (NR-SRS),” 2019.
- [37] 3GPP, „Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA); Physical Channels and Modulation,” 2017.